УДК 530.12:531.51

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

В.В. Ласуков

Томский политехнический университет
E-mail: lav_@list.ru

Получено уравнение состояния гравитационных атомов, которые могут быть той средой, которая породила содержимое нашей Вселенной, либо мини-вселенные. Найден гравитационный аналог первого закона термодинамики.

Введение

Подавляющее большинство ученых считает, что Вселенная является симметричной во времени, и на фундаментальном уровне описания природы стрела времени не существует. Считается, что стрела времени имеет субъективный характер, т.к. является следствием приближений, вносимых наблюдателем при описании природы. Необратимость – это видимость, которая исчезла бы, если бы мы располагали бы всей полнотой знания [1–3]. Однако в соответствии со вторым началом термодинамики часто реальные системы не обладают симметрией по отношению к обращению времени, что противоречит обратимости основных уравнений классической и квантовой теории.

Известно, что второй закон термодинамики является количественным определением необратимости. Второе начало термодинамики основано на неравенстве $d_iS\geq 0$, где d_iS – описывает энтропию, производимую внутри системы, изменение энтропии $dS=d_eS+d_iS$, d_eS – описывает перенос энтропии через границы. Считается, что необратимость процессов связана с однонаправленным временем ($t>0$). Необратимые процессы, связанные с возрастанием энтропии, диктуют необходимость использования вероятностной формулировки динамики, т.к. индивидуальное описание на основе ньютоновской механики и статистическое описание не всегда эквивалентны. Существует мнение, что теорию необратимых процессов можно сформулировать на основе обратимых механических законов. Основным уравнением такого подхода является уравнение Лиувилля, описывающее эволюцию плотности вероятностей системы в фазовом пространстве [3–5].

В этой связи на основе релятивистской термодинамики исследуется необратимость процесса рождения нашей Вселенной.

Релятивистская термодинамика Вселенной без сингулярности

В первой части работы построим термодинамику ранее разработанной модели Вселенной без сингулярности [6]. В отличие от Мира де Ситтера, Мир без сингулярности [6], описываемый решением

$$a = a_0\,\mathrm{ch}^{1/3}(\nu t), \nu = 4\omega,\ \omega = \sqrt{\frac{3\pi G U_0}{2}}, \quad \varphi = \varphi_0,\ U(\varphi) = U_0 > 0, \qquad (1)$$

допускает представление уравнения состояния в параметрическом виде

$$P = P(n),\ \ \varepsilon_a = \varepsilon(n),$$

где n – концентрация частиц, $G=M_p^{-2}$ – гравитационная постоянная, $M_p\approx 10^{-5}$ г – масса Планка, ω – постоянная, характеризующая скорость временной эволюции масштабного фактора $a(t)$, a_0 – константа интегрирования уравнения гравитационного поля, φ_0 – постоянное решение уравнения скалярного поля. В работе [6] показано, что решение (1) удовлетворяет дифференциальному закону сохранения плотности энергии вещества и гравитационного поля в **реальной** псевдоевклидовой метрике

$$\frac{\partial}{\partial t}[a^6(\varepsilon_\varphi - \varepsilon_a)] = 0. \qquad (2)$$

Одновременно это решение удовлетворяет дифференциальному закону сохранения плотности энергии вещества в **эффективном** римановом пространстве

$$\varepsilon'_\varphi a^3 + 3a^2 a'(\varepsilon_\varphi + P_\varphi) = 0\,, \qquad (3)$$

здесь $\varepsilon_\varphi = \frac{1}{2}\varphi'^2 + U(\varphi), P_\varphi = \frac{1}{2}\varphi'^2 - U(\varphi),\ \varepsilon_a = \frac{3}{8\pi G}(\frac{a'}{a})^2.$

Для решения (1)

$$\varepsilon_\varphi = U_0,\ \ P_\varphi = -U_0,\ \varepsilon_a = U_0\cdot \mathrm{th}^2(\nu t).$$

Учитывая (3), (2) для гравитационной составляющей ε_a можно представить в форме первого закона термодинамики

$$dE_a = -\tilde{P}\,dV, \qquad (4)$$

где $E_a = V\varepsilon_a$, $\tilde{P} = \varepsilon_a - 2U(\varphi)$, $V = \frac{4\pi}{3}a^3$.

Для скалярного поля

$$dE_\varphi = -P_\varphi dV, \qquad (5)$$

здесь $E_\varphi = \varepsilon_\varphi V$.

Вычитая из (4) уравнение (5) и учитывая (1), получим релятивистский первый закон термодинамики

$$dE = -PdV, \qquad (6)$$

где $\varepsilon = U_0 - \varepsilon_a = \frac{U_0}{\mathrm{ch}^2(\nu\, t)}$, $E = \varepsilon\, V = \frac{4\pi\, U_0\, a_0^3}{3\,\mathrm{ch}(\nu\, t)}$, $P = \varepsilon$.

Закон (6) описывает изменение собственной энергии E каждого элемента среды за счет работы PdV, совершаемой этим элементом над окружающей средой, так что между элементами среды в рассматриваемой модели не происходит теплообмена $dQ=dE+PdV=0$ что является очевидным следствием однородности Вселенной.

Представим объем V в виде $V = \frac{N_0}{n}$, где $n(t)$ – концентрация и N_0 – число частиц. Тогда (6) примет вид

$$\frac{N_0}{n}\,d\varepsilon + \varepsilon\, d\left(\frac{N_0}{n}\right) = -\varepsilon\, d\left(\frac{N_0}{n}\right)$$

или

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = -2\,n\,d\left(\frac{1}{n}\right) = 2\,\frac{dn}{n},$$

решение которого с учетом соотношения $\varepsilon = U_0 - \varepsilon_a = \frac{U_0}{\mathrm{ch}^2(\nu\, t)}$ равно

$$n = \frac{n_0}{\mathrm{ch}(\nu\, t)}, \qquad (7)$$

n_0 – константа интегрирования. При этом, для решения (1), общее число частиц является постоянной величиной

$$N = Vn_a \equiv N_0,\; N_0 = \frac{4\pi\, n_0\, a_0^3}{3}.$$

Исследуем устойчивость решения (1). Для этого введем обозначения

$$x = a(t),\; y = a'.$$

Тогда описывающее Вселенную без сингулярности дифференциальное уравнение второго порядка [6]

$$aa'' + 2(a')^2 = 8\pi GU_0 a^2$$

сводится к системе двух дифференциальных уравнений первого порядка

$$x' = y,$$

$$y' = 8\pi GU_0\, x - 2\frac{y^2}{x}.$$

Точка (0,0) на фазовой плоскости (XOY) является особой. Решение системы уравнений равно

$$x = a_0\,\mathrm{ch}^{1/3}(4\omega t),\; y = \frac{4\,a_0\omega}{3}\mathrm{sh}(4\omega\, t)\,\mathrm{ch}^{-2/3}(4\omega\, t).$$

Так как при $t\to\infty$ $|x|\to\infty$, $|y|\to\infty$, то решение (1) неустойчиво по Ляпунову. Исключая параметр t, получим характеризующее особую точку семейство гипербол на фазовой плоскости

$$\left(\frac{y}{y_0}\right)^2 - \frac{\left(\frac{x}{a_0}\right)^6 - 1}{\left(\frac{x}{a_0}\right)^4} = 0,$$

где $y_0 = \frac{4\,a_0\omega}{3}$.

В **локальной** классической термодинамике энтропия однородной среды определяется формулой Гиббса

$$dS = \frac{dE + pdV}{T} + \sum_{i=1}^{N}\frac{\partial S}{\partial\, n_i}dn_i,$$

где S – собственная энтропия любого малого элемента изучаемой среды, измеряемая локальным наблюдателем, E – собственная энергия элемента среды, V – его собственный объем, n_i – концентрации различных компонент. При этом предположение о **локальном** равновесии, выражаемое локальной формулой Гиббса, не противоречит тому факту, что система в целом не равновесна [7].

Из закона сохранения энергии (6) следует, что

$$dS = \frac{\partial S}{\partial n_a}dn_a, \qquad (8)$$

так что из всех причин увеличения энтропии двухкомпонентной среды остается возможной единственная – изменение состава среды.

Из формулы Гиббса можно получить термодинамическое соотношение Кельвина

$$\left(\frac{\partial E}{\partial V}\right)_{T,n} = T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{V,n} - P.$$

Так как $E=V\varepsilon$ и $P=\varepsilon$, то соотношение Кельвина можно представить в виде

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = 2\,\frac{dT}{T}.$$

Откуда находим $\varepsilon=C_0T^2$, так что с учетом $\varepsilon = U_0 - \varepsilon_a = \frac{U_0}{\mathrm{ch}^2(\nu\, t)}$ закон эволюции температуры имеет вид

$$T = \frac{T(0)}{\mathrm{ch}(\nu\, t)}, \qquad (9)$$

здесь $T(0)$ – константа интегрирования. Так как $P=\varepsilon=\dfrac{U_0}{\mathrm{ch}^2(\nu t)}$ и $V=\dfrac{4\pi a_0^3}{3}\mathrm{ch}(\nu t)$, то из (9) следует гравитационный аналог уравнения Менделеева-Клапейрона

$$\frac{PV}{T}=k_b N_0, \qquad (10)$$

описывающего двухкомпонентную среду, составленную из гравитационного ε_a и скалярного ε_φ полей. Здесь константа $N_0=\dfrac{4\pi a_0^3 U_0}{3\,k_b T(0)}$, k_b – постоянная Больцмана.

Если положить $n_0=\dfrac{U_0}{k_b T(0)}$, то константу N_0 можно интерпретировать как число частиц гравитационной составляющей, в роли которых могут выступать образованные эффективной частицей Планка с массой M_p и скалярным полем U_0 гравитационные атомы, способные порождать обычное вещество по механизму спонтанного излучения. Эффект спонтанного излучения гравитационного атома решает поставленную Эйнштейном задачу определения инертной массы через кривизну пространства-времени [8] и реализует план количественного понимания спектра вещества, сформулированный Гейзенбергом [9]. Одновременно это позволяет реанимировать принцип Маха в форме: нет имитирующего космологическую постоянную скалярного поля (U_0=0) – нет инертной массы. Массивные кванты спонтанного излучения гравитационного атома можно интерпретировать и как мини-вселенные. Так как с учетом эффекта "**уширения спектральной линии**" [10] процесс рождения обычного вещества, или мини-вселенных по механизму спонтанного излучения является необратимым процессом, то он способен порождать значение энтропии от единицы и до ее современного значения.

Релятивистский второй закон термодинамики можно представить в форме [11]

$$\frac{\partial}{\partial x^\mu}\left[s\frac{dx^\mu}{d\sigma}\sqrt{-g}\right]\delta x_1\delta x_2\delta x_3\delta x_0\ge\frac{\delta Q_0}{T_0},$$

где s – собственная макроскопическая плотность энтропии, измеренная в данной точке в данный момент времени локальным наблюдателем; $\dfrac{dx^\mu}{d\sigma}$ – компоненты четырехмерного вектора макроскопической скорости среды в некоторой точке и в некоторый момент времени; g – детерминант, образованный из компонент метрического тензора $g_{\mu\nu}$, измеренных макроскопически; $\delta x_1\delta x_2\delta x_3\delta x_0$ – макроскопически бесконечно малый элемент четырехмерного объема; δQ_0 – теплота, измеряемая относительно изучаемой среды локальным наблюдателем в данной точке в определенный момент времени, которая втекает в элемент среды, занимающий собственный объем δV_0, за интервал собственного времени δt_0; T_0 – абсолютная температура на границе элемента среды, измеренная с помощью обычных способов локальным наблюдателем, покоящимся в данный момент в выбранной точке.

Пространственные и временные интервалы при этом определены так, что

$$\delta V_0\delta t_0=\sqrt{-g}\;\delta x_1\delta x_2\delta x_3\delta x_0.$$

В метрике Логунова релятивистский второй закон термодинамики с учетом релятивистского первого закона термодинамики (6) и (8) описывается простой формулой, позволяющей отличать обратимые процессы от необратимых процессов,

$$\frac{d}{dt}[S]\ge 0,$$

где $S=s\delta V_0$, $\delta V_0=a^3r^2\sin^2(\vartheta)\delta r\delta\vartheta\delta\psi$ – собственный объем, $dt=a^3dx^0$ – собственное время; знак равенства отвечает случаю обратимого процесса эволюции Вселенной, когда он протекает с **конечной** скоростью в отличие от классической термодинамики, в которой необратимость является неизбежным следствием **конечной** скорости процесса; знак неравенства соответствует необратимым процессам, которые могут протекать только внутри каждого элемента среды. Рассмотренный в работе [8] процесс трансформации отрицательной потенциальной энергии скалярного поля в вещество может быть таким необратимым процессом, производящим энтропию.

В заключение отметим, что для Вселенной, описываемой решением (1), согласно закону (6) отсутствуют тепловые потоки, нет трения, т.к. нет никаких резервуаров и движущихся частей, нет перепада давления на границе, так как по предположению давление однородно по всему объему. Поэтому в релятивистской термодинамике возможны обратимые процессы, протекающие с **конечной** скоростью, и для которых исчезают источники необратимости, неизбежные с классической точки зрения.

Проведенное исследование показывает, что для локального наблюдателя температура, плотность, давление и концентрация в непосредственной близости от него уменьшаются, а частота космологического свечения сдвигается в красную сторону [12]. Поэтому следует иметь в виду, что с помощью обратимо эволюционирующей модели Вселенной можно имитировать процессы в реальной Вселенной, которые с точки зрения классической термодинамики можно принять за необратимые процессы. Это не означает, что в реальной Вселенной не имеют место необратимые процессы. Просто изучение космологии следует проводить с релятивистских, а не классических термодинамических позиций.

Энтропия будет вычислена во второй части, где так же будет проанализирован случай отрицательного скалярного поля. Во второй части работы рассмотрим с точки зрения релятивистской теории гравитации Логунова связь между термодинамикой и гравитационным аналогом статистической механики. Заключение будет сделано во второй части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Born M. The classical mechanics of atoms. – N.Y.: Ungar, 1960. – 453 p.
2. Gell-Mann M. The quark and the Jaguar. – L.: Little, Brown, 1994. – P. 218–220.
3. Пригожин И. Современная термодинамика. – М.: Мир, 2002. – 510 с.
4. Пригожин И. Неравновесная статистическая механика. – М.: Мир, 1964. – 314 с.
5. Зубарев Д.Н., Морозов В.Г., Ренке Г. Статистическая механика неравновесных процессов. Т. 1. – М.: Физматлит, 2002. – 431 с.
6. Ласуков В.В. Вселенная в метрике Логунова // Известия вузов. Физика. – 2002. – № 2. – С. 39–41.
7. Де Гроот С.Р., Мазур П. Неравновесная термодинамика. – М.: Мир, 1964. – 432 с.
8. Ласуков В.В. Рождение материи в ранней Вселенной // Известия вузов. Физика. – 2003. – № 9. – С. 49–55.
9. Гейзенберг В. Природа элементарных частиц // Успехи физических наук. – 1977. – Т. 121. – С. 657–668.
10. Зубарев Д.Н., Морозов В.Г., Ренке Г. Статистическая механика неравновесных процессов. Т. 2. – М.: Физматлит, 2002. – 139 с.
11. Толмен Р. Относительность, термодинамика и космология. – М.: Наука, 1974. – 520 с.
12. Ласуков В.В. Красное смещение // Известия вузов. Физика. – 2004. – № 4. – С. 88–92.

УДК 553.411.071:553.242.4